

(51)Int.Cl.<sup>7</sup>

H 05 H 1/00

識別記号

F I

H 05 H 1/00

テ-マ-ト(参考)

A

審査請求 有 請求項の数 8 O L (全 16 頁)

(21)出願番号

特願2000-190217(P2000-190217)

(71)出願人 301022471

独立行政法人通信総合研究所  
東京都小金井市貫井北町4-2-1

(22)出願日

平成12年6月23日 (2000.6.23)

(72)発明者 島津 浩哲

東京都小金井市貫井北町4-2-1 郵政  
省通信総合研究所内

(74)代理人 100097836

弁理士 福井 國敵

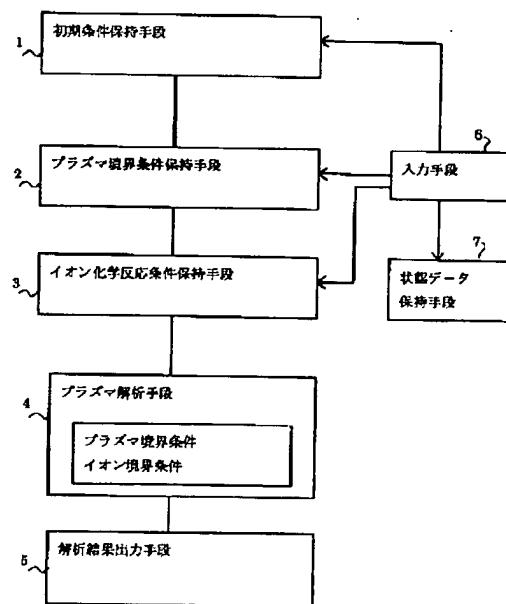
(54)【発明の名称】 プラズマ解析装置および方法

(57)【要約】

【課題】 プラズマ解析装置および解析方法に関し、イオンの化学反応が生じる系においても三次元でシミュレーションできるようにすることを目的とする。

【解決手段】 入力手段と演算手段と出力手段とを備え、プラズマを解析する装置において、運動方程式と、マックウェル方程式とによりプラズマを解析するプラズマ解析手段と、プラズマの境界条件を与える境界条件設定手段と、プラズマのイオン化学反応についての条件を設定するイオン化学反応条件設定手段とを備える。

本発明の基本構成



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 入力手段と演算手段と出力手段とを備え、プラズマを解析する装置において、運動方程式と、マックウェル方程式とによりプラズマを解析するプラズマ解析手段を備え、プラズマのイオン化学反応を解析条件としてプラズマ解析することを特徴とするプラズマ解析装置。

【請求項2】 プラズマ解析手段は、イオンを粒子とし、電子を流体としてプラズマを解析することを特徴とする請求項1に記載のプラズマ解析装置。

【請求項3】 解析対象の系における化学反応条件を設定する手段を備えることを特徴とする請求項1もしくは2に記載のプラズマ解析装置。

【請求項4】 プラズマ塊に一定の割合でプラズマを生成するプラズマ生成手段を備え、惑星をプラズマ塊とし、太陽風を外部から入射するイオンとし、太陽風とプラズマ塊もしくはプラズマ塊外部周辺での化学反応をイオン化学反応条件として、宇宙プラズマを解析するものであることを特徴とする請求項4に記載のプラズマ解析装置。

【請求項5】 入力手段により設定されたプラズマのイオン化学反応条件と、プラズマ粒子の運動方程式とマックウェル方程式に従って演算手段によりプラズマ現象を解析し、出力手段により解析結果を出力することを特徴とするプラズマ解析方法。

【請求項6】 運動方程式はイオンを粒子とし、電子を流体と見做してプラズマを解析することを特徴とする請求項5に記載のプラズマ解析方法。

【請求項7】 解析対象の系のイオン化学反応を条件とし、プラズマ解析することを特徴とする請求項5もしくは6に記載のプラズマ解析方法。

【請求項8】 惑星をプラズマ塊と見做し、プラズマ塊に一定の割合でプラズマを生成し、太陽風を該入射イオンとし、太陽風と該プラズマ塊、もしくは太陽風と該プラズマ塊外部周辺でのイオン化学反応を条件として宇宙プラズマを解析することを特徴とする請求項7に記載のプラズマ解析方法。

## 【発明の詳細な説明】

### 【0001】

【発明の属する技術分野】 プラズマ解析装置および解析方法に関するものである。特に、宇宙空間のプラズマをシミュレーションモデルにして記述した運動方程式と電磁界のマックスウェル方程式からプラズマ密度や速度の分布と電磁界とを、イオンの化学反応が生じる系においても三次元でシミュレーションできるものである。

【0002】 本発明は、宇宙開発関連産業、プラズマ工学分野等で利用できるものである。

### 【0003】

【従来の技術】 太陽風と惑星のプラズマの相互作用等のプラズマ現象の計算機シミュレーションにおいて、イオ

ンを粒子、電子を流体として扱うハイブリットコードが使われてきた。惑星を非磁性体の固体球とみなすモデルを使用し、太陽風と惑星とのプラズマ相互作用をシミュレーションすることができる。ハイブリットコードを宇宙プラズマに適用した例は次の論文に説明されている。

【0004】 (1) Leroy, M. M., D. Winske, C. C. Goodrich, C. S. Wu, and K. Papadopoulos, "The structure of perpendicular bow shocks", *Journal of Geophysical Research*, vol. 87, pp. 5081-5094 (1982)。

【0005】 図12(a)は惑星を非磁性体の固体とみなし、太陽風と惑星とのプラズマ相互作用を解析するモデルを示す。

【0006】 惑星110を非磁性体の固体球とみなし、プラズマ流である太陽風が照射されることを示している。惑星に照射する太陽風のプラズマイオンは惑星表面で反射し、一部イオンは惑星内部に侵入し、内部で消滅するモデルである。

【0007】 このモデルについて、ハイブリッドコードによりシミュレーションした結果は次の論文等で詳細に説明されている。

【0008】 (2) Shimazu, H., "Three-dimensional hybrid simulation of magnetized plasma flow around an obstacle", *Earth, Planets and Space*, vol. 51, pp 383-393 (1999)。

### 【0009】

【発明が解決しようとする課題】 先行技術の説明  
惑星の上層に電離層が存在する場合には、図12(a)のように惑星を固体と見做して、太陽風との相互作用をシミュレーションすることは実際に合わないものである。実際の惑星の上層には電離層があり、惑星をプラズマ塊と見做すことができる。そこで、本出願の発明者は、惑星をプラズマ塊としてシミュレーションを試みた（「太陽風と火星金星型惑星との相互作用の3次元ハイブリッドシミュレーション」地球惑星圏学会第106回総会・講演会、仙台市民会館、1999年11月9日-12日、講演番号B12-P054で発表）。

【0010】 図12(b)は惑星を半径Rの球のプラズマ塊として扱い、太陽風がプラズマ塊に照射するモデルを示す。

【0011】 図12(b)において、110は惑星であり、プラズマ塊である。惑星に照射する太陽風のイオン( $H^+$ )は惑星内部に入り、惑星内のイオン( $O^+$ )と混合することもある。

【0012】 このモデルについて、ハイブリットコード

を使用して、イオンの運動方程式とマックス方程式を解いて、プラズマ密度、速度分布および電磁界を計算機シミュレーションした結果を模式的に表したものと図13に示す。

【0013】図13において、110は惑星であり、プラズマ塊である。111は衝撃波（パウショックであり、以後ショックと称する）。図13に示されるように太陽風は超音速のプラズマ流であり、このプラズマ流が

$$\mathbf{B} = \begin{cases} \nabla \left\{ B_0 y \left( 1 + \frac{R^3}{2r^3} \right) \right\} & (r > R) \\ 0 & (r < R) \end{cases}$$

【0016】シミュレーションは宇宙空間を  $6.4 \times 6.4 \times 6.4$  に分割された空間（格子空間）とし、その内部の粒子密度、粒子速度等の平均値を格子点におけるそれぞれの値とする。そして、格子点での値をデータとして差分化した運動方程式、マックスウェル方程式等を使用して宇宙プラズマ現象をシミュレーションした。

【0017】シミュレーションにおけるアルベノ速度  $V_A$  と光速度  $c$  の比を  $V_A / c = \omega_{ci} / \omega_{pi} = 1.0 \times 10^{-4}$  とした。 $\omega_{ci}$  はイオンのサイクロトロン角周波数である。 $\omega_{pi}$  はイオンプラズマ振動の角周波数である。

【0018】熱圧力と磁気圧力の比は電子とイオンについて、 $\beta_e = \beta_i = 1$  とした。太陽風の速度は  $v_{sw} = 4.0 V_A$  である。

【0019】電離層に包まれた惑星を半径  $R$  のプラズマ球として表現する。太陽風は  $x$  軸方向に左から右に流れ、磁束密度は  $y$  方向である。初期状態において、太陽風の動圧と惑星プラズマの圧力はほぼつりあっている。  $L$  はシミュレーションする宇宙空間の大きさを示す。プラズマ球へのイオンの供給率は  $0.256 \omega_{pi}$  である。

【0020】図15 (a), (b), (c) は、惑星をプラズマ球としたモデルにおけるシミュレーション結果を示す。

【0021】図15 (a) は  $y = L/2$  での断面図であり、シミュレーション開始後、 $\omega_{ci} t = 37.5$  の時点でのイオン速度の  $x$  成分を示す。イオン速度は  $V_i x / V_A$  で表している。図13 (a) において、惑星中心は座標 (102.4, 102.4) にあり、太陽風は  $x$  軸方向（左から右）に吹いている。図示のようにショックが形成される。惑星半径は、 $R = 6.4 r_L$  である ( $r_L = v_{sw} / \omega_{ci}$ ) である。

【0022】図15 (b) は  $y = L/2$  での断面図における磁束密度の大きさを示す。磁束密度は  $|B| / B_0$  で表している ( $B_0$  は初期条件で与えた磁束密度の大きさである)。図15 (c) は  $y = L/2$  での断面図にお

惑星の磁気圏に入る時に前面にショック 111 が生じる。

【0024】図14 (a) は、プラズマ塊モデルにより解析する時のパラメータを示す。図14 図 (b) は初期条件および境界条件を与えるモデルを示す。図14 (b) において、磁束密度は次式により与えられる。

【0015】

【数1】

( $r > R$ )

( $r < R$ )

【0016】シミュレーションは宇宙空間を  $6.4 \times 6.4 \times 6.4$  に分割された空間（格子空間）とし、その内部の粒子密度、粒子速度等の平均値を格子点におけるそれぞれの値とする。そして、格子点での値をデータとして差分化した運動方程式、マックスウェル方程式等を使用して宇宙プラズマ現象をシミュレーションした。

【0017】シミュレーションにおけるアルベノ速度  $V_A$  と光速度  $c$  の比を  $V_A / c = \omega_{ci} / \omega_{pi} = 1.0 \times 10^{-4}$  とした。 $\omega_{ci}$  はイオンのサイクロトロン角周波数である。 $\omega_{pi}$  はイオンプラズマ振動の角周波数である。

【0018】熱圧力と磁気圧力の比は電子とイオンについて、 $\beta_e = \beta_i = 1$  とした。太陽風の速度は  $v_{sw} = 4.0 V_A$  である。

【0019】電離層に包まれた惑星を半径  $R$  のプラズマ球として表現する。太陽風は  $x$  軸方向に左から右に流れ、磁束密度は  $y$  方向である。初期状態において、太陽風の動圧と惑星プラズマの圧力はほぼつりあっている。  $L$  はシミュレーションする宇宙空間の大きさを示す。プラズマ球へのイオンの供給率は  $0.256 \omega_{pi}$  である。

【0020】図15 (a), (b), (c) は、惑星をプラズマ球としたモデルにおけるシミュレーション結果を示す。

【0021】図15 (a) は  $y = L/2$  での断面図であり、シミュレーション開始後、 $\omega_{ci} t = 37.5$  の時点でのイオン速度の  $x$  成分を示す。イオン速度は  $V_i x / V_A$  で表している。図13 (a) において、惑星中心は座標 (102.4, 102.4) にあり、太陽風は  $x$  軸方向（左から右）に吹いている。図示のようにショックが形成される。惑星半径は、 $R = 6.4 r_L$  である ( $r_L = v_{sw} / \omega_{ci}$ ) である。

【0022】図15 (b) は  $y = L/2$  での断面図における磁束密度の大きさを示す。磁束密度は  $|B| / B_0$  で表している ( $B_0$  は初期条件で与えた磁束密度の大きさである)。図15 (c) は  $y = L/2$  での断面図にお

ける惑星の酸素イオンの分布を示す。図16 (a) は  $x = L/2$  での断面図であり、シミュレーション開始後、 $\omega_{ci} t = 37.5$  の時点でのシミュレーション結果での磁束密度の大きさを示す。図16 (a) において、惑星は実線の円で示され、ショック面は惑星を囲むぼんやりした円で示される。図16 (a) のように、シミュレーションではショックの惑星からの高さは  $z$  軸の正方向で大きく、 $z$  軸の負方向で小さい（ショック面は惑星に対して  $z$  軸の正方向にずれている）。

【0023】これは、実際の観測結果と異なり、実際の観測結果はショックの惑星からの高さは、図16 (c) に示すように  $z$  軸の正方向で小さく、 $z$  軸の負方向で大きい（ショック面は惑星に対して  $z$  軸の負方向にずれている）ことが観測されている。

【0024】図16 (b) は  $x = 3L/4$  での断面図であり、シミュレーション開始後、 $\omega_{ci} t = 37.5$  の時点での磁束密度の大きさを示す。

【0025】上記の太陽風と惑星プラズマの相互作用のモデルでは、惑星の高層で生じるイオン反応（光電離や荷電交換等）が扱われていなかった。そのためショック面と惑星との位置関係のシミュレーション結果が必ずしも正しいものではなかった。

【0026】本発明は、イオンの化学反応が生じるプラズマ系においても正確に三次元でシミュレーションできるプラズマ解析装置および方法を提供することを目的とする。

【0027】

【課題を解決するための手段】図1は、本発明の基本構成を示す。

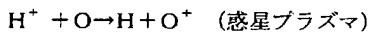
【0028】図1において、1は初期条件保持手段であって、入力手段6により入力された初期条件を入力するものである。2はプラズマの境界条件保持手段であって、入力手段6により入力されたプラズマ境界条件を保持するものである。3はイオン化学反応条件保持手段で

あって、入力手段6により入力されたプラズマの化学反応についての条件を保持するものである。4はプラズマ解析手段であって、粒子の運動方程式、マックスウェル方程式、初期条件、境界条件、イオン化学反応条件およびプラズマ状態を表すデータ（イオン生成率等のデータ）によりプラズマ解析をするものである。5は解析結果出力手段であって、解析結果を出力するものである。6は入力手段である。7はプラズマの状態データ保持手段である。

【0029】図1の本発明の基本構成の動作を説明する。

【0030】入力手段6により、初期条件、プラズマの境界条件、プラズマに生じる化学反応の条件を入力する。また、プラズマのイオンサイクロトロン周波数、イオン生成率等のプラズマ状態データを入力し、状態データ保持手段7に保持する。プラズマ解析手段4は、初期条件、境界条件、イオン化学反応条件およびプラズマの状態データによりプラズマに生じる状態を解析する。出力手段5は求められたプラズマ状態を出力する。

【0031】化学反応条件は、例えば、太陽風と惑星の相互作用の場合、太陽風のイオン（ $H^+$ ）と惑星イオン（ $O^+$ ）とした時、



とする等である。O、Hはイオン化していない原子なので、解析においてプラズマから除かれる。このような化学反応条件の場合、イオン反応のため、電流変化となってプラズマの運動などに影響するものである。後述する

$$m_i \frac{dv}{dt} = q(E + v/c \times B - \eta j) \quad (1)$$

【0038】イオンの速度の式

【0039】

【数3】

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (2)$$

$$-e(E + v_e/c \times B - \eta j) - \frac{1}{n} \nabla(n_e k_B T_e) = 0 \quad (3)$$

【0042】ただし、電子温度 $T_e$ は一定とする。

【0043】マックスウェル方程式

【0044】

【数5】

$$\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times E \quad (4)$$

$$n_e = n_i = n$$

本実施の形態では電気伝導度は無限大と仮定する ( $\eta =$

が、太陽風と惑星イオンとの相互作用のシミュレーションにおいて、本発明のシミュレーション装置および方法によれば、惑星とショックの高さの関係は、前述の本発明に先行する方法では、得られなかつたのであるが、図8に示すように実際の観測結果と一致するようになつた。

【0032】本発明によれば、プラズマの初期条件、境界条件だけでなく、イオン反応条件もシミュレーションの条件にしてプラズマを解析できるので、イオンの化学反応が生じるプラズマ系においても正確に三次元でシミュレーションできるようになる。

【0033】なお、本発明のプラズマ解析装置および方法は、宇宙プラズマに適用するだけでなく、実験室等のプラズマにも適用できるものである。

【0034】

【発明の実施の形態】本発明を実施するためのハイブリッドコードについて説明する。以下において、B、E、v、jは全て3次元ベクトルであり、それぞれベクトルB、ベクトルE、ベクトルv、ベクトルj等で表す。ベクトルxは位置ベクトルである。Bは磁束密度、Eは電界、vはイオン速度、jは電流をそれぞれ表す。

【0035】ハイブリッドコードにより解析する場合の基礎方程式は次のとおりである。

【0036】イオンの運動方程式

【0037】

【数2】

【0040】電子流体（質量なし）の運動方程式

【0041】

【数4】

$$\nabla \times B = \frac{4\pi}{c} J \quad (5)$$

【0046】準中性条件

（6）

0)。

【0047】シミュレーションでは上記の式を差分化して使用する。

【0048】上記のマックスウェルの方程式(4)を差分化すると次のようになる。

【0049】

【数7】

$$\mathbf{B}_{k+1} = -2c \Delta t \nabla \times \mathbf{E}_k + \mathbf{B}_{k-1} \quad (7)$$

$$\mathbf{v}_{k+1} = (2q \Delta t / m_i) (\mathbf{E}_k + \mathbf{v}_k / c \times \mathbf{B}_k - \eta \mathbf{j}_k) + \mathbf{v}_{k-1} \quad (8)$$

【0053】

【0050】ベクトル  $\mathbf{B}_{k+1}$  から式(5)を用いてベクトル  $\mathbf{j}_{k+1}$  を得る。

【0051】式(1), (2)を差分化すると次のようになる。

【0052】

【数8】

$$\mathbf{x}_{k+3/2} = \Delta t \mathbf{v}_{k+1} + \mathbf{x}_{k+1/2} \quad (9)$$

【0054】時刻  $k$  の磁束密度は時刻  $k+1$  の磁束密度

【数14】

と時刻  $k-1$  の磁束密度とにより次のように表せる。

【0055】

【数10】

$$\mathbf{B}_k = (1/2)(\mathbf{B}_{k+1} + \mathbf{B}_{k-1}) \quad (10)$$

【0056】時刻  $k+1$  の位置ベクトルは次のように表せる。

【0057】

【数11】

$$\mathbf{x}_{k+1} = (1/2)(\mathbf{x}_{k+3/2} + \mathbf{x}_{k+1/2}) \quad (11)$$

【0058】イオン速度と密度を格子点毎に足しあわせることにより格子点の速度ベクトル  $\mathbf{v}_i$  と密度  $n_i$  が得られる。電子流体の速度ベクトル  $\mathbf{v}_e$  は電流を表す次の式で求まる。

【0059】

【数12】

$$\mathbf{v}_e = (qn_i \mathbf{v}_i - \mathbf{j}) / en_e \quad (12)$$

【0060】電界ベクトル  $\mathbf{E}$  は電子速度ベクトル  $\mathbf{v}_e$  と電子流体の運動方程式と準中性条件の式とにより求めることができる。

【0061】格子点におけるイオンの密度、速度は、格子点から近いものから大きく、遠いものは寄与が小さいようにする。

【0062】具体的には、図4のような形状関数を使用する。

【0063】密度は

【0064】

【数13】

$$n(x) = \sum_{j=1}^N S(x - x_j) \quad (13)$$

【0065】となる。

【0066】速度平均は

【0067】

$$v_i(x) = \sum_{j=1}^N v_j S(x - x_j) \quad (14)$$

【0068】で求まる。Nはシミュレーション対象の宇宙空間の全粒子数である。

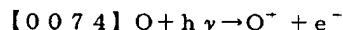
【0069】図2は本発明の装置構成の実施の形態を示す。

【0070】図2は、イオンを粒子とし電子を流体として扱うハイブリットコードにより解析するための構成を示す。

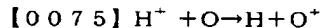
【0071】11は入力する初期条件を表す(磁束密度ベクトル  $\mathbf{B}_0$ ,  $\mathbf{B}_1$ , 電界ベクトル  $\mathbf{E}_0$ , 粒子密度  $n_0$ , 粒子速度ベクトル  $\mathbf{v}_{i0}$ )。12は入力手段である。13は演算手段を表す。14は演算結果の時刻  $k+1$  における電界ベクトル  $\mathbf{E}_{k+1}$ , 磁束密度ベクトル  $\mathbf{B}_{k+1}$ , 電流密度ベクトル  $\mathbf{j}_{k+1}$ , 粒子密度  $n_{k+1}$ , 粒子の位置ベクトル  $\mathbf{x}_{k+1}$ , 粒子の速度ベクトル  $\mathbf{v}_{k+1}$  である。15は出力手段である。20はデータ保持手段である。21は初期条件保持部である。22は境界条件保持部である。17は状態データであって、イオンの生成率等のパラメータを表す。31はハイブリッドコードにより解析する場合の演算式を保持する演算式保持部であり、上記の差分化方程式、その他演算に必要な式を保持するものである。32は差分化イオン運動方程式である。33は差分化電子運動方程式である。34は差分化マックスウェル方程式である。35は電子流体の速度の式である。36は粒子中性条件であって、 $n_i = n_e = n$  を保持するものである。36は粒子密度の平均、粒子速度の平均値を求める式である。37はその他演算に必要な式である。

【0072】本発明のプラズマ解析装置を使用して、以下のモデルにより太陽風と惑星(火星、金星等)の相互作用をシミュレーションする場合について説明する。プラズマの生成率、プラズマ球の半径、初期の磁束密度は先行シミュレーション(前述のプラズマ塊モデル)の場合と同じである。

【0073】(1) 半径Rの惑星を表すプラズマ球の外側(1.0Rと1.3Rの星側)で、光電離があるとする。



(2) 同じ領域に荷電交換があるとする。



中性化した分子は計算に無関係になるので、(1)の場合にはO<sup>+</sup>がある割合で生成することになる。太陽風のH<sup>+</sup>は変化させないものとする。生成する位置は、上記の領域内で一様に分布するように乱数を用いて決める。

(2) の場合は、ある割合で太陽風が消え、その分O<sup>+</sup>が生成することに等価である。即ち、1.0Rと1.3Rの間に達した太陽風のイオン(H<sup>+</sup>)のうち、あらかじめ決めておいた割合を消滅させる。消滅した位置にO<sup>+</sup>を生成させる。この結果は粒子の平均化の処理(後述する)によりベクトルv<sub>i</sub>とnの変化にあらわれ、全体の計算に影響する。(1)、(2)において、イオン速度は、温度が惑星イオンの温度と同じ速度分布になるように乱数で決める。速度分布は次の式(13)で表されるマクスウェル分布となるようにする。

【0076】

【数15】

$$f(v) = A \exp\left(-\frac{v^2}{v_{th}^2}\right) \quad (13)$$

【0077】Aは次になるように定める。

【0078】

【数16】

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(v) dv = n$$

【0079】(1/2) m v<sub>th</sub><sup>2</sup> = k<sub>B</sub> Tである。nは粒子密度、mはイオン質量、k<sub>B</sub>はボルツマン定数、Tは温度である。

【0080】図3は図2の構成の動作のフローチャートである。図3の動作を説明する。S1で磁束密度、電界、粒子速度、密度の初期条件ベクトルB<sub>0</sub>、ベクトルB<sub>1</sub>、ベクトルE<sub>1</sub>、ベクトルv<sub>io</sub>、nを入力する。B<sub>0</sub>の初期条件は、図14(b)と同じである。

【0081】初期条件は、太陽風および惑星のイオン速度がマクスウェル分布になるように与える。太陽風温度と惑星プラズマの温度は同じにする。

【0082】S2で時刻kの電界ベクトルE<sub>k</sub>とB<sub>k-1</sub>とによりマクスウェルの方程式に従ってB<sub>k+1</sub>を求める。次にS3でマクスウェル方程式により時刻k+1の磁束密度ベクトルB<sub>k+1</sub>を使って、時刻k+1の電流密度ベクトルJ<sub>k+1</sub>を求める。次にS4でイオンの粒子密度n<sub>i</sub>、電子密度n<sub>e</sub>(=n)と速度v<sub>i</sub>と時刻k+1の電流密度ベクトルJ<sub>k+1</sub>を使って、時刻k+1の電子

の速度ベクトルv<sub>i</sub>を求める。

【0083】次に、S5で、時刻k+1の電子の速度ベクトルv<sub>e</sub>、磁束密度ベクトルB<sub>k+1</sub>、電流密度ベクトルJ<sub>k+1</sub>、荷電密度n<sub>e</sub>、ボルツマン定数k<sub>B</sub>、電子温度T<sub>e</sub>とにより、時刻k+1の電界ベクトルE<sub>k+1</sub>を求める。次に時刻をk=k+2により更新して、S2以降の処理を繰り返す。

【0084】上記のメインルーチンに対して、境界条件、イオン反応条件、粒子密度の平均化、粒子速度の平均化はサブルーチン(S11, S12, S13, S14)で処理する。

【0085】S11で太陽風とプラズマ塊の境界条件を入力する。惑星を半径Rのプラズマ球とする。太陽風のイオンは陽子(H<sup>+</sup>)であり、半径Rの惑星のイオンは酸素イオン(O<sup>+</sup>)であるとする。

【0086】S12でイオン反応条件を入力する。

【0087】前述したように、(1)惑星を含むプラズマ球の外側(1.0Rと1.3Rの星側)で、光電離(O + hν → O<sup>+</sup> + e<sup>-</sup>)があるとする。本実施の形態では生成率は0.256ω<sub>pi</sub>とした。

【0088】(3) 同じ領域に荷電交換(H<sup>+</sup> + O → H + O<sup>+</sup>)があるとする。本実施の形態では生成率は0.212ω<sub>pi</sub>とした。

【0089】S13で、粒子密度平均を求める。粒子密度の平均は、宇宙空間の全粒子を元に図4の形状関数をもとに求める。

【0090】図4の形状関数の横軸の-1と+1はシミュレーションの対象にする宇宙空間を64×64×64に分割した格子の1つの面に対応するので、格子点での平均粒子密度はほぼ格子内の粒子密度の平均になる。

【0091】S14で粒子速度の平均を求める。粒子密度と同様に図4の形状関数を使用して空間の全粒子により平均を求める。

【0092】S13, S14の結果は、S4とS5で呼び出されて使用される。

【0093】図5は上記のモデルの説明図である。

【0094】110は惑星であって、半径Rのプラズマ球である。イオンは酸素イオン(O<sup>+</sup>)である。半径1.0Rと1.3Rの領域で、光電離反応(O + hν → O<sup>+</sup> + e<sup>-</sup>)および荷電交換(H<sup>+</sup> + O → H + O<sup>+</sup>)がある。

【0095】図6(a), 図6(b)はシミュレーション結果を示す。図6(a)と図6(b)は、それぞれ、時刻37.5/ω<sub>ci</sub>の光電離のみ、および荷電交換がある場合の、y=L/2面における電子速度のx成分を示す。惑星中心は(102.4, 102.4)の位置にある。

【0096】図6(a) (b)に示されるように、バウショックが生成される。

【0097】図7(a)と図7(b)は、それぞれ、光

電離のみがある場合と、荷電交換がある場合に、 $y = L/2$ 面における、磁束密度を示す。磁気障壁が図示のように形成される。図7 (a) は (b) を比較する時、磁気障壁の強さは、荷電交換が含まれる時の方が大きいことが示されている。

【0098】図8 (a) は光電離のみがある場合の $x = L/2$ 面の磁場強度を示す。図8 (b) は荷電交換がある場合の $x = L/2$ 面の磁場強度を示す。

【0099】惑星中心から測定されたショックの高さは、図8 (a) において、 $+z$ 方向において惑星中心に對して、他の側より 7.98 パーセント大きい。非対称性の方向は、光電離も荷電交換もない前回のシミュレーションと一致する。しかし、荷電交換が含まれる図8 (b) の場合は、ショック高度の惑星中心に対する非対称性は図8 (a) の場合と反対になり、実際の観測結果に一致する。惑星からのショックの高さは、電場方向 ( $-z$  方向) において反対方向側より 7.79 % 大きい。

【0100】ショック高度が異なる原因を確かめるため、イオンの速度分布を考察した。

【0101】図9 (a), (b) は、 $y = z = L/2$  ラインに沿ってのイオン速度の位相空間分布 ( $v_z - x$ ) を示す。図9 (a) は光電離のみがある場合であり、図9 (b) は荷電交換がある場合を示す。図9 (a) と (b) の違いは、 $[x / (c / \omega_{pi}) = 70$ 付近] のエッジ部分である。荷電交換がある場合には、そこで惑星イオンは  $-z$  方向に加速される。

【0102】この加速に対する理由として、一般化されたオームの法則におけるホール項 ( $j \times B$  項、ここに  $j$  は電流であり、ホール電流と呼ばれる) を考える。図10 は、 $j \times B$  の  $z$  成分を示す ( $x$  成分および  $y$  成分は、 $z$  成分より小さい)。図10 (a) と図10 (b) を比較すると、その大きさは、荷電交換がある時の方が大きい。 $j \times B$  の  $z$  成分は、主に  $j_x$  と  $B_y$  により生成される ( $x$  軸は太陽風の流れの方向であり、 $y$  軸は周囲の磁場方向である)。電流  $j_x$  は、荷電交換が生じたことによりイオンと電子の間の速度の差により生成される。

【0103】イオンは、ホール項に起因する電場により影響され、そして  $-z$  方向の側に加速される。図11 (a), (b) は、 $x = 80c/\omega_{pi}$ ,  $y = L/2$ ,  $z = 80c/\omega_{pi}$  における速度空間 ( $v_z - v_x$ ) の分布を示す。図11 (a) は光電離のみがある場合であり、図11 (b) は荷電交換がある場合である。荷電交換がある場合には、イオンが電場により散乱されることを示している。

【0104】上記は荷電交換が  $H^+ + O \rightarrow H + O^+$  の場合のシミュレーションであるが、さらに、次の荷電交換反応がある場合についてもシミュレーションを行なった。

【0105】 $H^+ + H \rightarrow H + H^+$

その結果のショック高度の非対称の方向は、酸素の場合と同様であることが示された。従って、ホール電流がショックの非対称を生成するものであることが確かめられ、それは実際の観測結果と一致している。

【0106】上記のように、前回のシミュレーションでは衝撃波 (ショック) の高さが電場方向 ( $-$  (ベクトル  $v_0$ )  $\times$  (ベクトル  $B$ ) の方向 ( $-z$  方向) で低いという結果がでていたが、実際に金星を調べた結果によると、電場の方向でショック高度は大きいことが分かっている。惑星をプラズマ塊と見做した場合にも、シミュレーションでは実際と異なった結果が得られていたが、荷電交換を考慮してシミュレーションを行なった場合には、実際の観測結果とシミュレーション結果が一致する。光電離のみ考慮した場合にはシミュレーションと実際の観測結果は一致しなかった。荷電交換がある場合には、太陽風イオンが消え、 $O^+$  が生成され、余分の電流が生成される。その結果、強い磁気バリアが作られる。そのため、この磁気バリアがショックの高さの違いを生じるものと考えられる。

【0107】

【発明の効果】上記のように、本発明によれば、プラズマ現象の解析にイオン反応を与えることが容易にできるようになり、正確なプラズマ現象のシミュレーションが可能になる。

【0108】特に、本発明を宇宙プラズマの解析装置として使用した場合には、惑星の前面に生じる衝撃波の電界方向の非対称性を再現することが可能になり、宇宙プラズマを正確にシミュレーションすることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の基本構成を示す図である。

【図2】本発明の装置構成の実施の形態を示す図である。

【図3】本発明の実施の形態のフローチャートを示す図である。

【図4】形状関数の例を示す図である。

【図5】宇宙プラズマのモデルの例を示す図である。

【図6】本発明のシミュレーション結果を示す図である。

【図7】本発明のシミュレーション結果を示す図である。

【図8】本発明のシミュレーション結果を示す図である。

【図9】本発明のシミュレーション結果を示す図である。

【図10】本発明のシミュレーション結果を示す図である。

【図11】本発明のシミュレーション結果を示す図である。

【図12】プラズマのモデルの例を示す図である。

【図13】プラズマ塊モデルに基づくシミュレーション

結果の例を示す図である。

【図1 4】プラズマ現象の解析に使用するパラメータおよび初期条件の例を示す図である。

【図1 5】プラズマ塊モデルに基づくシミュレーション結果を示す図である。

【図1 6】プラズマ塊モデルに基づくシミュレーション結果を示す図である。

【符号の説明】

1 : 初期条件保持手段

2 : プラズマ境界条件保持手段

3 : イオン化学反応条件保持手段

4 : プラズマ解析手段

5 : 解析結果出力手段

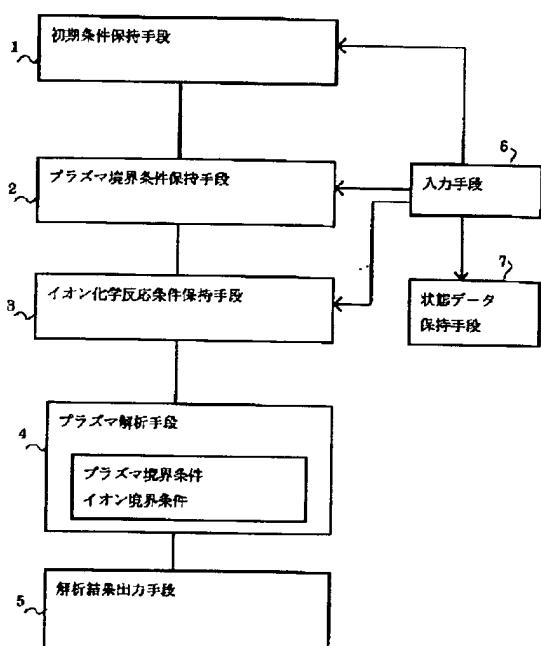
6 : 入力手段

7 : 状態データ保持手段

【図1】

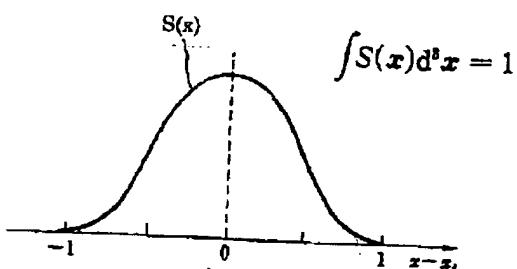
【図4】

本発明の基本構成

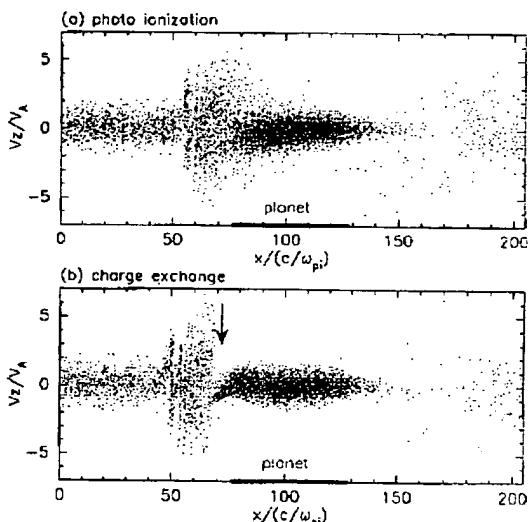


【図5】

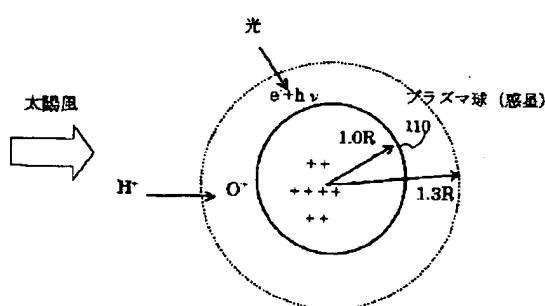
形状関数の例



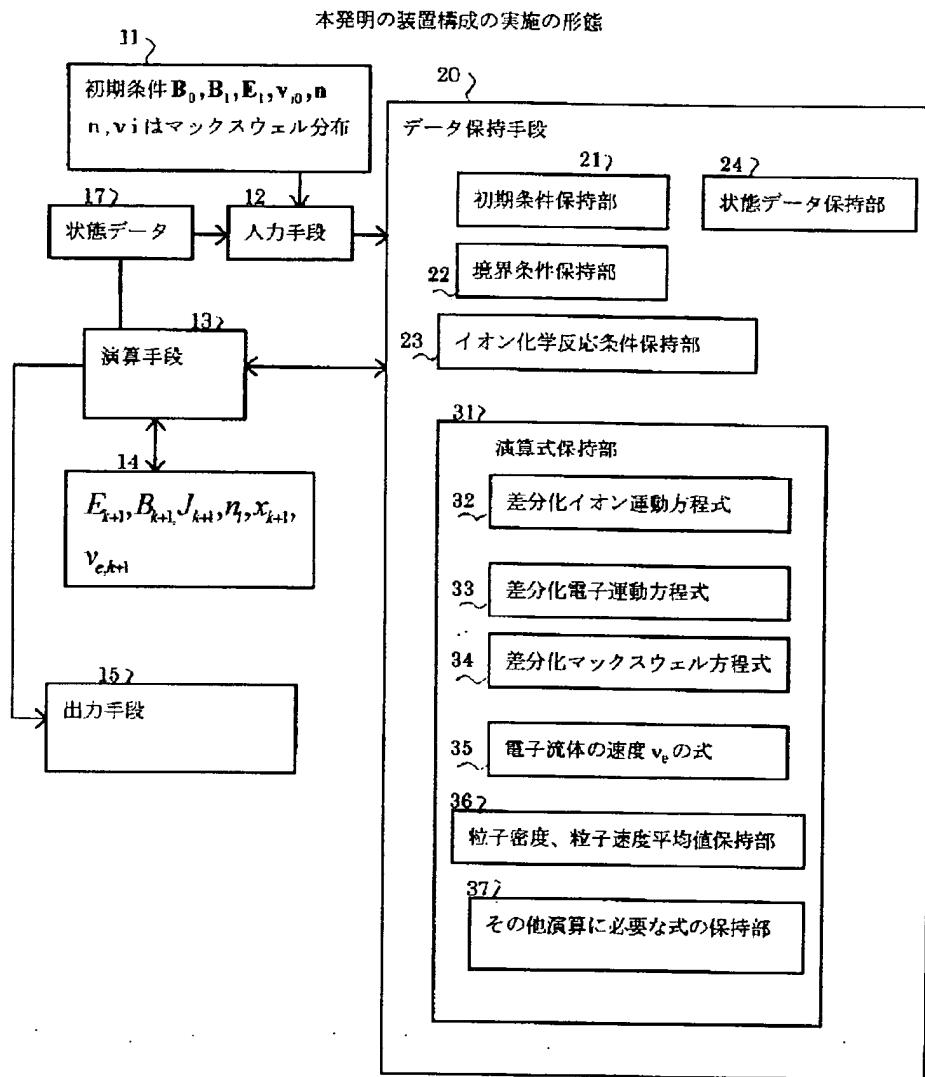
【図9】



宇宙プラズマのモデルの例

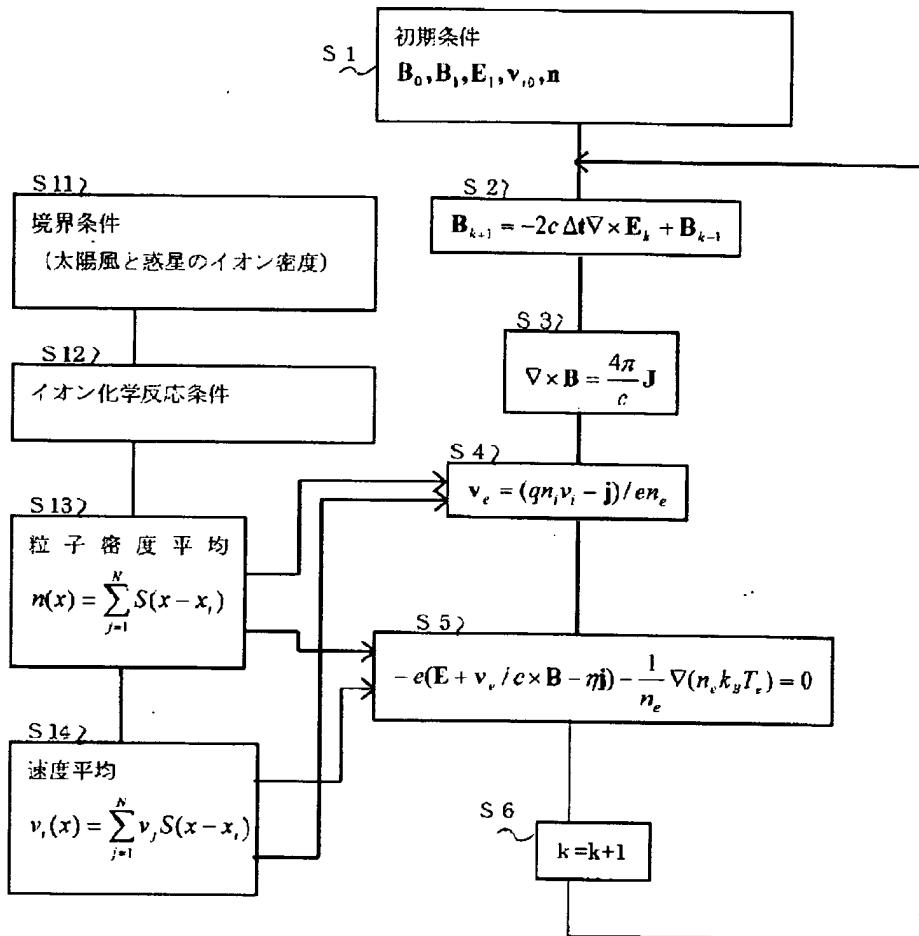


【図2】



【図3】

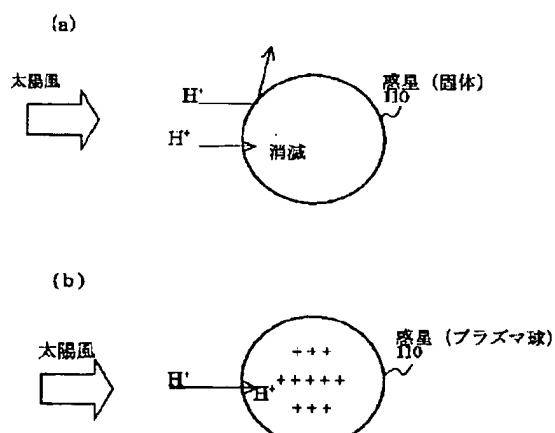
本発明の実施の形態のフローチャート



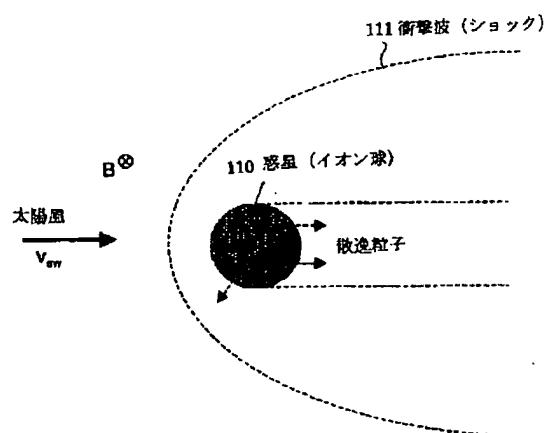
【図12】

【図13】

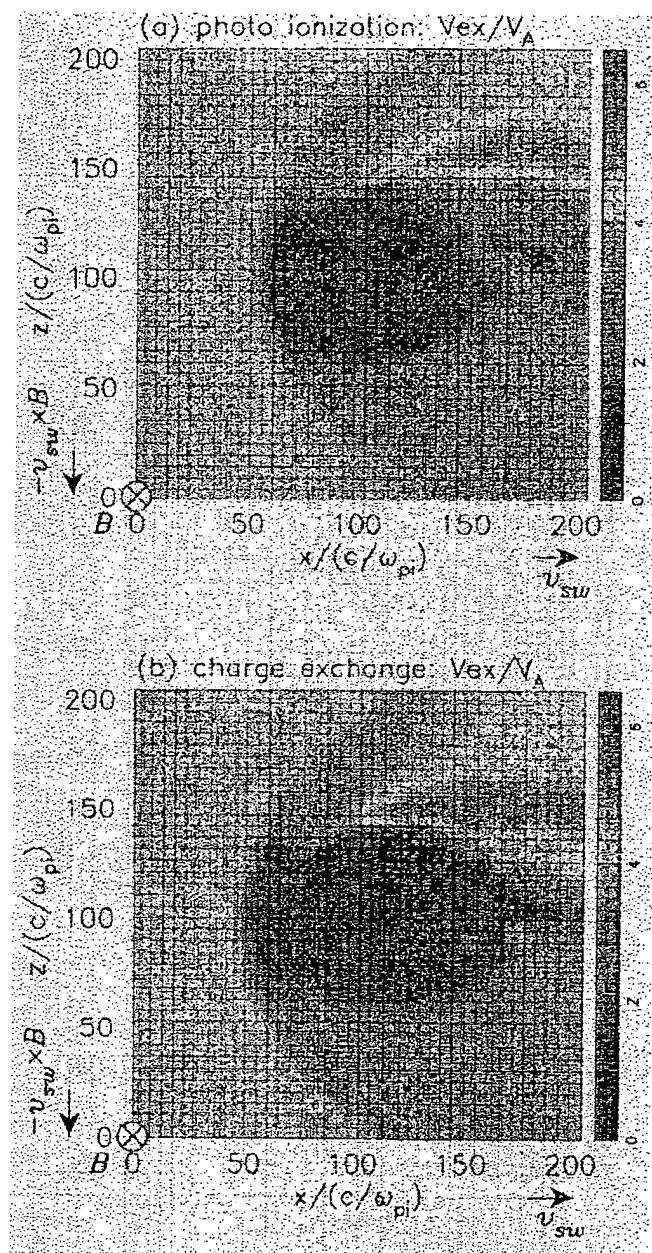
宇宙プラズマのモデルの例



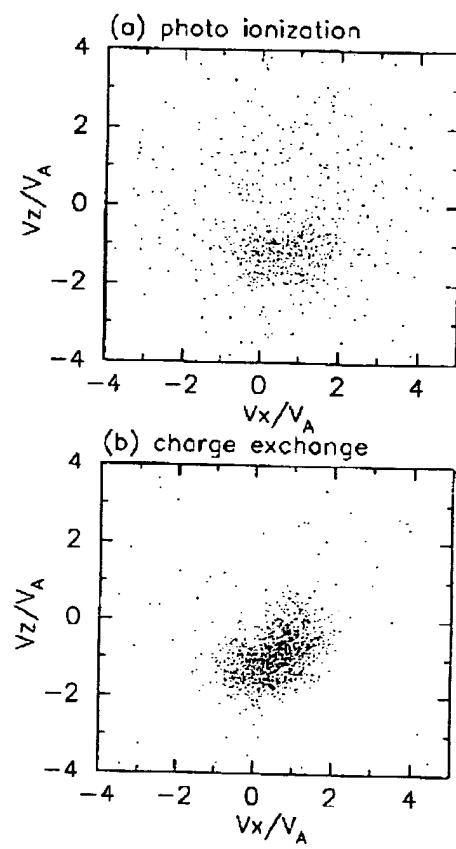
シミュレーション結果の例



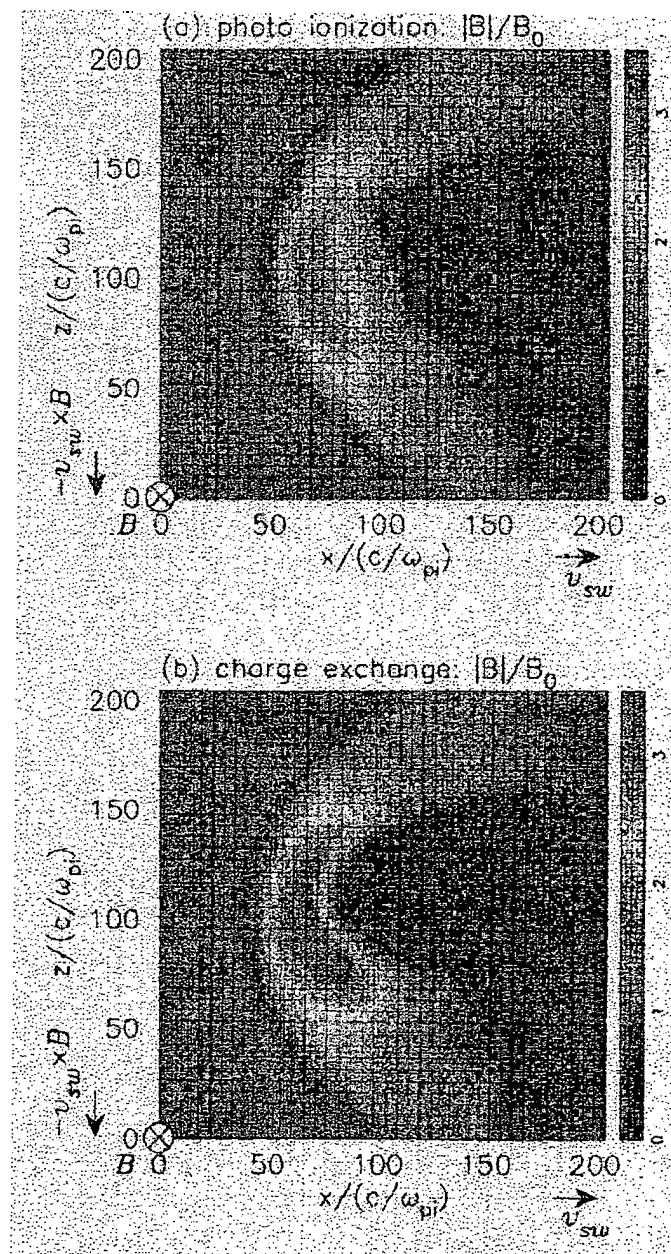
【図6】



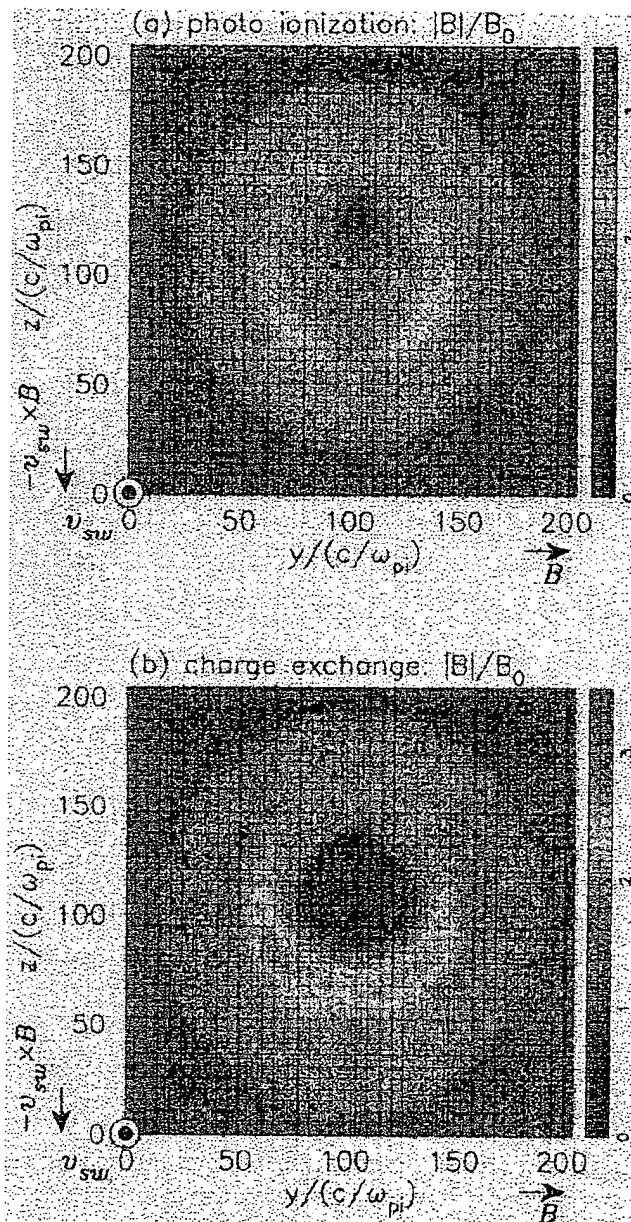
【図11】



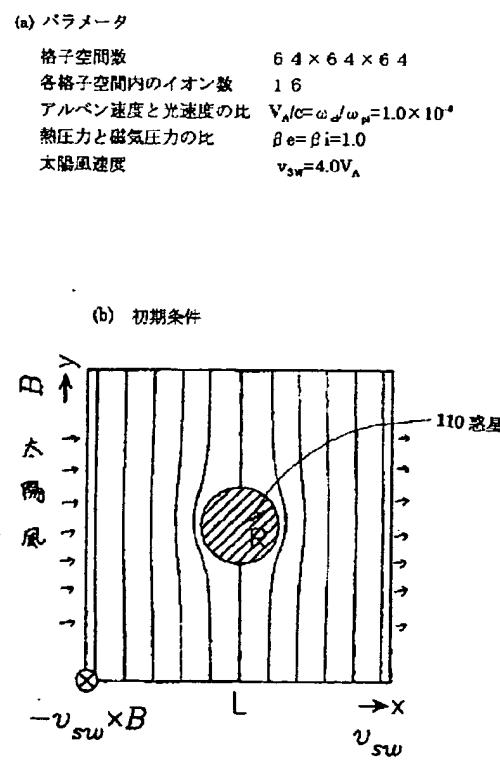
【図7】



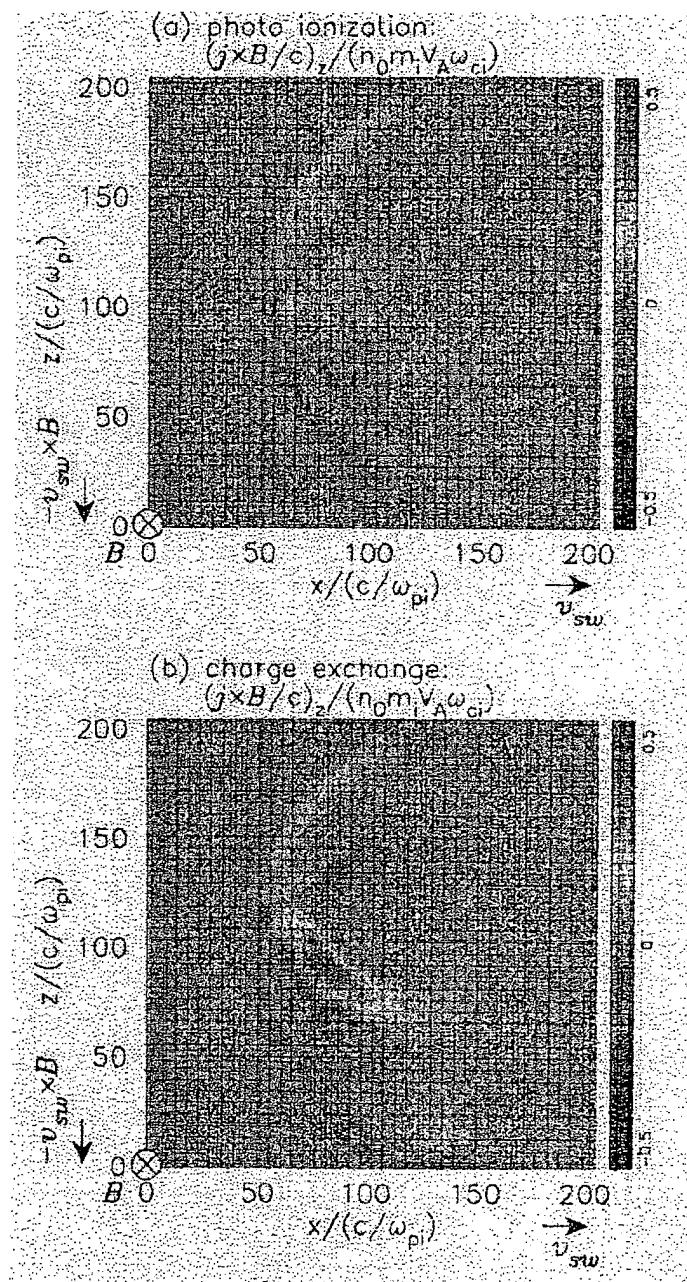
【図8】



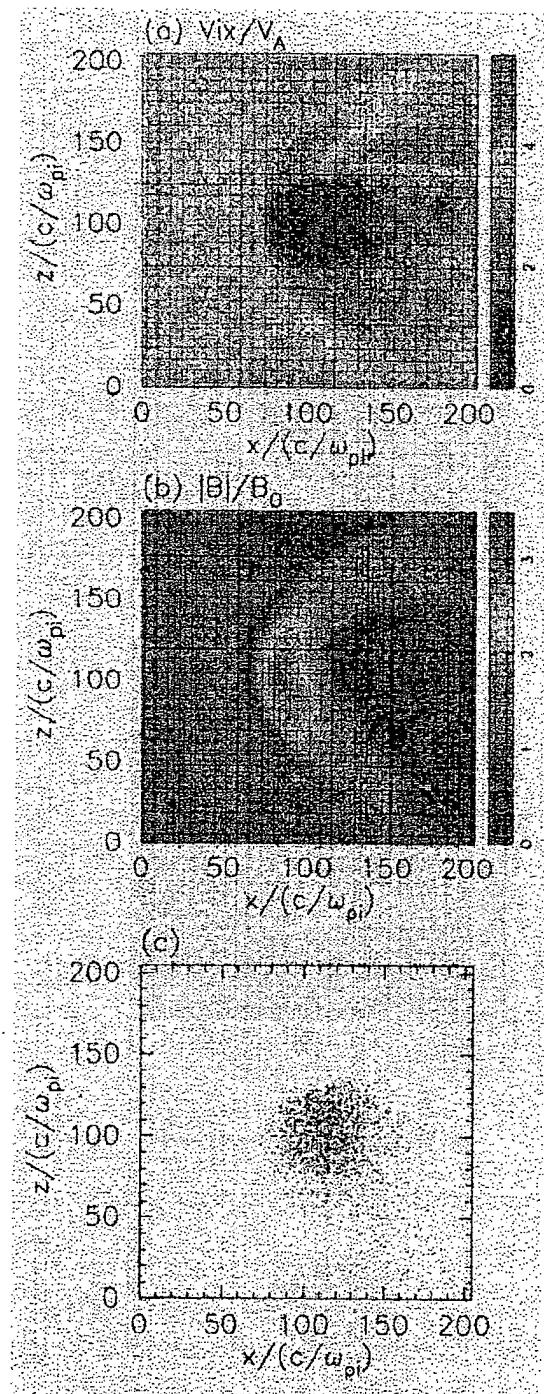
【図14】



【図10】



【図15】



【図16】

